

Обоснование выбора схемы предварительной обработки воды на ТЭС на основе метода ультрафильтрации

А.В. Жадан¹, Е.Н. Бушуев²

¹ЗАО «НПК Медиана-Фильтр», г. Москва, Российская Федерация

²ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново, Российская Федерация

E-mail: admin@xxte.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: На отечественном энергетическом рынке появилось новое водоподготовительное оборудование, основанное на мембранных методах обработки воды. Широкому внедрению этого оборудования в производство мешает отсутствие нормативной базы на его использование и противоречивый опыт эксплуатации головных установок на отечественных ТЭС. Актуальными являются исследования условий эффективного использования мембранных технологий, особенно для обработки природных вод с повышенным содержанием органических веществ, что характерно для поверхностных вод центра и севера России.

Материалы и методы: Исследования проведены с использованием методов лабораторного и промышленного эксперимента на промышленных водоподготовительных установках.

Результаты: Исследована эффективность работы и получены результаты обработки природных вод с повышенным содержанием органических примесей на элементах и установках ультрафильтрационной технологии очистки в зависимости от качества и температуры поступающей воды и типа фильтрующих мембран. На основе метода ультрафильтрации обоснована схема предварительной очистки природной воды.

Выводы: Схема предварительной очистки природной воды, основанная на методе ультрафильтрации, позволяет надежно получать осветленную воду, удовлетворяющую требованиям к питательной воде установки обратного осмоса.

Ключевые слова: тепловые электрические станции, водоподготовка, мембранные методы, ультрафильтрация.

Rationale for selecting water treatment schemes at thermal power plants based on ultrafiltration technique

A.V. Zhadan¹, E.N. Bushuev²

¹Closed Corporation "NPK Mediana-Filtr", Moscow, Russian Federation

²Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

E-mail: admin@xxte.ispu.ru

Abstract

Background: The domestic energy market has recently seen the introduction of new water treatment equipment based on membrane water treatment methods. But this equipment cannot be widely applied to manufacturing as there are no laws regulating its use and the experience of operating head installations at Russian thermal power plants is contradictory. Therefore, it is urgent to study the conditions of effective use of membrane technologies, in particular for treatment of natural water with a high content of organic matter typical of surface waters in Central and Northern Russia.

Materials and methods: The studies were conducted by methods of laboratory and industrial experiments at industrial water treatment plants.

Results: We have studied the operation efficiency and analyzed the results obtained by processing natural water with a high content of organic impurities at the elements and installations of ultrafiltration purification technology depending on the quality and the inlet water temperature and the type of filter membranes, allowing the scheme to justify the pre-treatment of natural water.

Conclusions: The technique of natural water treatment based on ultrafiltration makes it possible to reliably receive clarified water that meets the requirements for the reverse osmosis setup feed water.

Key words: thermal power plants, water treatment, membrane methods, ultrafiltration.

Традиционная схема подготовки добавочной воды энергетических котлов с давлением более 10 МПа предполагает две ступени обработки исходной воды:

1) пресочистка, реализуемая по методу коагуляции (или коагуляции с известкованием) в осветлителе, и фильтрация на механических фильтрах;

2) деминерализация, реализуемая по методу химического или термического обессоливания.

В настоящее время вместо традиционных технологий обессоливания воды все чаще предусматриваются мембранные технологии подготовки добавочной воды. Однако специфика природных вод центра и севера России состоит в невысокой их минерализации и по-

вышенном содержании железоорганических примесей, поэтому традиционная схема предочистки (осветлители и насыпные механические фильтры) оказывается недостаточной для подготовки питательной воды установок обратного осмоса (УОО) [1].

Имеющийся опыт эксплуатации УОО свидетельствует о том, что основным фактором, от которого зависит удовлетворительная работа мембран, является соблюдение норм качества воды, подаваемой на эту установку. Анализ требований производителей (табл. 1) показывает, что ограничения по концентрации солей, содержащихся в поверхностных водоисточниках, практически отсутствуют, возможна работа установки в широком диапазоне показателя рН. Ограничивается лишь содержание тех веществ, которые могут привести к отравлению или забиванию мембран. Фирмы-производители обратноосмотических элементов оценивают качество обрабатываемой воды преимущественно коллоидным показателем SDI. Предельно допустимое SDI – 5, а при значениях SDI от 3 до 5 производители относят такие воды к проблемным, устойчивая работа обратноосмотического элемента гарантируется при SDI < 3, т. е. при малом содержании коллоидных примесей.

Таблица 1. Требования к воде, поступающей на УОО

Показатель	Значение
Температура, °С	До 45
Концентрация свободного хлора, мг/л	До 0,1
Показатель рН во время работы	2–11
Показатель рН во время промывки	1–12
Концентрация железа, мг/л	До 0,1
Содержание органических веществ по общему органическому углероду (ТОС), мг/л	До 3
Концентрация марганца, мг/л	До 0,1
Мутность, НТН	До 0,1
Концентрация масел и нефтепродуктов, мг/л	До 0,1
Коллоидный индекс SDI	До 5

Перспективным вариантом снижения индекса SDI в обрабатываемой воде западными фирмами-производителями, а вслед за ними и отечественными адаптерами является предварительная обработка исходной (природной) воды на установке ультрафильтрации (УУФ) [2, 3]. Эта установка включает мембранные фильтрующие элементы с увеличенными по сравнению с УОО порами [4]. Такое решение не отменяет, как правило, и традиционной предочистки, требует дополнительных исследований

на типичных природных водах в реальных отечественных промышленных установках.

На ТЭЦ-20 Мосэнерго сотрудниками ЗАО «НПК Медиана-Фильтр» были проведены лабораторные испытания УУФ, предвключенной перед установкой обратного осмоса. В качестве исходной воды для установки использовалась вода из циркуловода, прошедшая Накатионитные фильтры. Некоторые результаты проведенных исследований представлены в табл. 2.

Анализ полученных результатов (табл. 2) показывает, что без использования коагулянта (проба №2) снижение растворенных органических веществ и соединений железа невелико, получаемый фильтрат не соответствует требованиям к поступающей воде на УОО.

Аналогичные исследования проведены на целом ряде отечественных ТЭС, в частности Среднеуральской ГРЭС, Шатурской ГРЭС, Петрозаводской ТЭЦ, Череповецкой ГРЭС, расположенных в различных регионах России на водоемах разной степени сложности, в том числе, в период паводков и в период цветения водорослей и планктона. Исследования показали, что для эффективного использования УУФ в схемах водоподготовки на ТЭС для получения гарантированного качества воды перед УОО необходима предварительная коагуляция исходной воды.

Существенное влияние на эффективность процесса оказывает полнота смешения реагентов с обрабатываемой водой, а также время контакта. В ряде случаев применение перемешивания воздухом существенно улучшает процесс коагуляции. Время контакта коагулянта с водой после введения и перемешивания при температуре обрабатываемой воды 28–35 °С должно составлять не менее 10 мин до подачи на УУФ. Особенно длительное время контакта требуется при коагуляции технической воды, уже прошедшей обработку различного рода ингибиторами. Обеспечение необходимого времени контакта реагентов с водой может быть организовано за счет промежуточного бака, устанавливаемого после точки их ввода.

Установлено, что первичное хлорирование с дозой 0,5–1,0 мг/л по активному хлору существенно улучшает процесс и коагуляция возможна при меньших дозах. Однако в случае применения хлорирования необходимо осуществлять связывание остаточного активного хлора для предотвращения повреждения мембран, чувствительных к нему.

Таблица 2. Результаты лабораторных исследований УУФ

№ п/п	Водный поток	рН	Щ _о , мг-экв/л	С _{Fe} , мкг/л	Ок, мгО/л	С _{Al} , мкг/л	SDI
1	Исходная вода	8,70	3,15	269	6,08	8	–
2	Фильтрат УУФ (без коагуляции)	8,49	3,05	236	6,24	7	>6,67
3	Фильтрат УУФ (D _к =7 мгAl/л; τ=15 мин)	7,26	2,60	73	4,48	48	2,2
4	Фильтрат УУФ (D _к =8 мгAl/л; τ=5 мин)	7,75	2,50	84	4,32	152	–

Примечание: D_к – доза вводимого коагулянта; τ – время контакта коагулянта с обрабатываемой водой

Проведенные на Среднеуральской ГРЭС исследования показали, что применение технологии напорной ультрафильтрации с предварительной коагуляцией для очистки природной воды обеспечивает стабильное снижение окисляемости (рис. 1) и цветности исходной воды, получение воды питьевого качества, удовлетворяющего требованиям СанПиН 2.1.4.1071-01¹ и требованиям к качеству питательной воды УОО. В качестве коагулянта возможно использование сульфата алюминия и полиоксихлорида алюминия или их смеси. Использование органических катионных флокулянтов позволяет уменьшить дозу коагулянта в 1,5 раза.

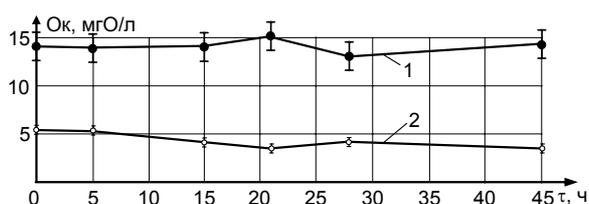


Рис. 1. Изменение показателей качества исходной воды (1) и фильтрата УУФ (2) в ходе экспериментов

Проведенные опыты показали, что длительность обратной промывки начиная с 45 с практически не влияет на проницаемость мембран. Химически усиленные промывки с применением раствора едкого натра также показали прямую зависимость восстановления проницаемости мембран от величины pH. Опытным путем была определена оптимальная величина значения pH, равная 13.

Были проведены также исследования влияния температуры воды на эффективность очистки на УУФ. Испытания проводились на подогретой воде, а также на холодной воде при температуре 8–11 °С. В качестве коагулянта использовался сульфат алюминия. Проведенные опыты показали, что, хотя процесс коагуляции на холодной воде протекает хуже, чем на подогретой, очистка методом ультрафильтрации остается стабильной при небольшом росте дозы коагулянта. При снижении температуры обрабатываемой воды увеличивается вязкость воды, в результате задерживающая способность мембран улучшается, что выгодно отличает метод ультрафильтрации от традиционных методов предочистки, где снижение температуры воды ведет к росту дозы реагентов и проскоку алюминия в осветленную воду.

Опыты показали, что оптимальным временем контакта на холодной воде является 15–20 мин. При уменьшении времени контакта до 5 мин и менее происходит контактная коагуляция на мембране или внутри мембраны. Возможен проскок алюминия в фильтрат.

Традиционные водоподготовительные установки на ТЭС включают осветлители. Для них температурный режим составляет 25–40 °С. Современные технологии водоподготовки, такие как обратный осмос, противоточный ионообмен, позволяют использовать установку водоподготовки с меньшим подогревом исходной воды или вообще без последнего. Это очень важно, поскольку тепловая составляющая себестоимости обработанной воды велика и может достигать до 30 %. Если нагревать воду с 10 °С (средняя температура исходной воды) не до 30, а до 20 °С (такая температура подходит и для технологии противоточного обмена, и для мембранных методов обессоливания), то тепловая составляющая сокращается в два раза, а себестоимость 1 м³ обессоленной воды снижается в среднем на 15 %.

При использовании на стадии предочистки осветлителей температура исходной воды поддерживается с точностью ±1 °С. Колебание температуры обрабатываемой воды выше этого значения приведет к разрушению в осветлителе слоя взвешенного шлама и его выносу. При использовании на стадии предочистки УУФ нет необходимости поддерживать с такой точностью температуру обрабатываемой воды.

На следующем этапе исследований при обработке воды Исетского озера (Среднеуральская ГРЭС) проведено сравнение основных технологических характеристик часто употребляемых мембранных элементов УУФ: Hydracap 60 (фирма HYDRANAUTICS), SXL225FSCC (фирма NORIT) и SFX-2660 (фирма DOW CHEMICAL) (табл. 3).

Поскольку площади всех трех мембранных элементов различны, а расход в процессе эксперимента поддерживался постоянным (2500 л/ч), удельные расходы для каждого элемента получились разные: Hydracap – 60–54 л/(м²·ч); SFX-2660 – 73,5 л/(м²·ч); SXL225FSCC – 62,5 л/(м²·ч). Для объективного сравнения использовался показатель «проницаемость мембраны» (μ , дм³/(м²·ч·атм)), который представляет собой отношение удельного расхода фильтрата к перепаду давления на мембране:

$$\mu = J/TMP, \quad (1)$$

где J – удельный расход обрабатываемой воды, дм³/(м²·ч); TMP – падение давления на мембране, атм.

Изменение проницаемости рассмотренных мембранных элементов в процессе промышленного исследования показано на рис. 2.

¹ СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества.

Таблица 3. Полученные рабочие характеристики мембранных элементов

Тип элемента	Hydracap 60	SXL225FSCC	SFX-2660
Площадь фильтрующей поверхности, м ²	46	40	33
Удельный съем, л/(м ² ·ч)	54	62,5	73,5
Максимальное трансмембранное давление, атм	0,5	0,45	1,2
Максимальное давление обратной промывки, атм	1,4	0,8	2,5
Изменение рабочего трансмембранного давления, атм	0,36 – 0,45	0,28 – 0,4	0,5 – 0,7
Проницаемость в конце испытаний, л/(м ² ·ч·атм)	150	200	Менее 100
Удельный расход обратной промывки, л/(м ² ·ч)	250	330	260
Режим работы мембраны	Тупиковая фильтрация изнутри наружу		Тупиковая фильтрация снаружи внутрь

Анализ полученных зависимостей (рис. 2) показывает, что для мембраны SXL225FSCC (фирма NORIT) после прохода 20 м³ воды наблюдался перелом, и далее проницаемость не менялась. Это связано с тем, что 20 м³ составляет примерно 7–9 фильтроциклов при производительности мембраны 3 м³/ч. Практика показывает, что через 7 фильтроциклов необходимо осуществлять химически усиленную обратную промывку. В данном случае новая мембрана «выходила на режим», и, после того как произошло первое безвозвратное загрязнение пор, проницаемость мембраны стабилизировалась.

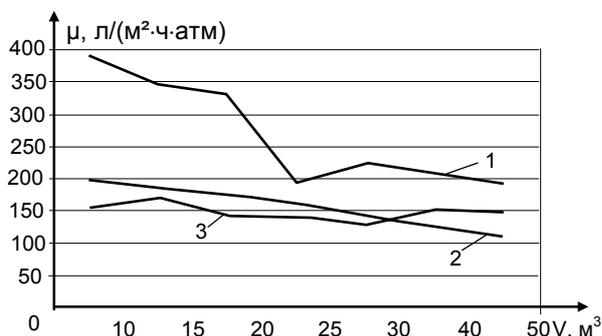


Рис. 2. Зависимость проницаемости различных типов мембранных элементов УУФ от количества пропущенного фильтрата: 1 – SXL225FSCC; 2 – SFX-2660; 3 – Hydracap 60

Из изученных мембранных элементов УУФ наилучшими рабочими характеристиками обладают элементы SXL225FSCC фирмы NORIT, показавшие высокую проницаемость мембран (выше 200 л/(м²·ч·атм)) при устойчиво небольшом трансмембранном давлении в пределах 0,28–0,40 атм и расходе воды на обратную промывку 330 л/(м²·ч). Положительный результат использования мембран компании NORIT обусловлен, прежде всего, материалом мембраны (полиэфирсульфон), который более устойчив к рН воды, что позволяет проводить химически усиленные обратные промывки при более высоких значениях показателя рН (рН = 13) и, соответственно, более эффективно удалять загрязнения, прежде всего органические соединения. Наиболее оптимальным режимом работы мем-

браны является пропуск обрабатываемой воды изнутри наружу.

На основании проведенного исследования может быть предложена схема предочистки на основе метода ультрафильтрации (рис. 3) [5].

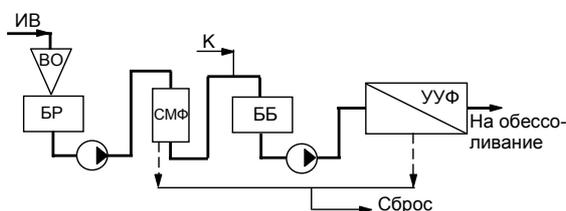


Рис. 3. Схема комбинированной установки для подготовки глубоко обессоленной воды с применением ионообменной доочистки: ИВ – исходная вода; ВО – воздухоотделитель; БР – бак разрыва струи; СМФ – самопромывные механические фильтры; К – коагулянт; ББ – буферный бак

В исходной воде содержится растворенный воздух, концентрация которого, особенно при заборе воды из поверхностного водоема в холодное время года, значительна. Поэтому для предотвращения негативного влияния растворенного воздуха производится его отделение в воздухоотделителе. Далее исходная вода после емкости разрыва струи подается на механический самопромывной фильтр, где происходит удаление загрязняющих частиц крупнее 100 мкм. Затем в воду вводятся реагенты (коагулянт, флокулянт и т.д.), она выдерживается заданное время в буферной емкости, после чего поступает на модуль ультрафильтрации, в результате чего получают 85–90 % фильтрата и 10–15 % промывной воды, содержащей механические (взвеси), органические и микробиологические загрязнения. Промывная вода сбрасывается в дренаж [6].

Установка перед УУФ предвключенного осветлителя всегда оказывает положительное влияние на работу ультрафильтрационных мембран, повышает срок их службы и сокращает расход воды на собственные нужды. Целесообразность использования осветлителей в каждом конкретном случае должна определяться технико-экономическим обоснованием.

Список литературы

1. Бушуев Е.Н., Еремина Н.А., Жадан А.В. Анализ современных технологий водоподготовки на ТЭС // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 1. – С. 8–14.

2. Юрчевский Е.Б., Первов А.Г., Пичугина М.А. Применение обратноосмотической технологии обессоливания воды в энергетике – 20 лет // Энергосбережение и водоподготовка. – 2009. – № 5. – С. 2–8.

3. Первов А.Г., Юрчевский Е.Б. Использование мембранных технологий в системах водоподготовки энергетических объектов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2005. – № 5. – С. 10–14.

4. Первов А.Г. Современные высокоэффективные технологии очистки питьевой и технической воды с применением мембран: обратный осмос, нанофильтрация, ультрафильтрация. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2009. – 239 с.

5. Проектные решения водоподготовительных установок на основе мембранных технологий / А.А. Пантелеев, Б.Е. Рябчикова, А.В. Жадан, О.В. Хоружий // Теплоэнергетика. – 2012. – № 7. – С. 30–36.

6. Бушуев Е.Н., Новоселова А.С. Выбор экологически эффективной технологии водоподготовки на Заинской ГРЭС // Вестник ИГЭУ. – 2008. – Вып. 4. – С. 8–12.

References

1. Bushuev, E.N., Eremina, N.A., Zhadan, A.V. Analiz sovremennykh tekhnologiy vodopodgotovki na TES [Analysis

of modern water treatment techniques used at thermal power plants]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 1, pp. 8–14.

2. Yurchevskiy, E.B., Pervov, A.G., Pichugina, M.A. Primenenie obratnoosmoticheskoy tekhnologii obessolivaniya vody v energetike – 20 let [Application of reverse-osmosis water treatment technology in power engineering – 20 years]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*, 2009, no. 5, pp. 2–8.

3. Pervov, A.G., Yurchevskiy, E.B. Ispol'zovanie membrannykh tekhnologiy v sistemakh vodopodgotovki energeticheskikh ob'ektov [Using membrane technologies in water treatment systems of power facilities]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*, 2005, no. 5, pp. 10–14.

4. Pervov, A.G. *Sovremennyye vysokoeffektivnyye tekhnologii ochistki pit'evoy i tekhnicheskoy vody s primeneniem membran: obratnyy osmos, nanofil'tratsiya, ul'trafil'tratsiya* [Modern high-efficiency technologies of drinking and process water treatment by using membranes: reverse osmosis, nanofiltration, ultrafiltration]. Moscow, Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov, 2009. 239 p.

5. Panteleev, A.A., Ryabchikova, B.E., Zhadan, A.V., Khoruzhiy, O.V. *Proektnyye resheniya vodopodgotovitel'nykh ustanovok na osnove membrannykh tekhnologiy* [Design concepts of water treatment units based on membrane technologies]. *Teploenergetika*, 2012, no. 7, pp. 30–36.

6. Bushuev, E.N., Novoselova, A.S. *Vybor ekologicheskii effektivnoy tekhnologii vodopodgotovki na Zainskoy GRES* [Selecting an ecologically efficient technology of water treatment at Zainsk Hydraulic Power Plant (Zainskaya GRES)]. *Vestnik IGEU*, 2008, issue 4, pp. 8–12.

Жадан Александр Владимирович,
ЗАО «Научно-производственная компания Медиана-фильтр»,
генеральный директор,
e-mail: jadan@mediana-filter.ru

Бушуев Евгений Николаевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, зав. кафедрой автоматизации технологических процессов,
телефон (4932) 26-99-09,
e-mail: admin@xxte.ispu.ru